

**С. И. ЧЕРВОННЫЙ**, канд. техн. наук, проф. НТУ “ХПИ”,  
**В. В. ВЫПРИЦКИЙ**,  
**Г. В. ГЕЙКО**

## **К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЧИСЛА ПЕРЕХОДОВ ЧЕРЕЗ НОЛЬ СМЕСИ СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА И ШУМА**

З метою відпрацювання методів проведення обчислювальних експериментів із визначення кількості переходів крізь нульовий рівень суми синусоїдального сигналу та шуму, були проведені експерименти з порівнянням оцінок результатів обчислювального експерименту та обчислення за формулами, отриманими аналітичним шляхом. Експерименти проведено для декількох моделей шуму та зроблено висновок щодо можливого застосування цих моделей в подальших обчислювальних експериментах. Результати використовуються для розробки алгоритму обробки сигналу датчика вихрового потоковимірювача.

This paper discuss the methods of the undertaking computing experiment on number of zero crossing determination for noised sine form signal. There were made some experiments with experimental and theoretical formulas dates comparison. There were used several noise models and conclusion were made on possibility to use such computing experiments in future. The results are used for vortex flowmeter sensor signals processing algorithm development.

**Постановка проблемы.** При прохождении жидкости по трубе в момент достижения жидкостью критической скорости  $V_{кр}$ , которая убывает с ростом радиуса трубы и с уменьшением вязкости, происходит превращение «прямого» (ламинарного) движения в «извилистое» (турбулентное). Если на пути движения жидкости стоит препятствие, то за этим телом обтекания образуются вихри.

Устройства, которые предназначены для измерения расхода, использующие вышеописанный эффект, называются вихревыми потокоизмерителями. Вихревые потокоизмерители обладают рядом достоинств, одним из которых является простота и дешевизна. В таких потокоизмерителях величина расхода определяется по частоте сигнала.

Для простых схем измерителей со структурой «вихреобразователь – датчик давления – формирователь импульсов – счётчик» возникает задача определения нижнего порога измерений по следующей причине, так как в области малых интенсивностей потоков обычно автоматически возникает состояние «мёртвого хода»: поток есть, а счётчик его не регистрирует, а в вихревых: потока нет, а счётчик, возможно, регистрирует частоты шумов.

**Анализ литературы.** Пределы измерений таким способом конечны, так как в вихревых потокоизмерителях частота вихрей при снижении скорости уменьшается вместе с более существенным уменьшением амплитуды сигнала датчика [1]. Так, экспериментально полученная зависимость между

скоростью потока и частотой сформированных импульсов выглядела как на рис. 1.



Рис. 1. Зависимость частоты импульсов от скорости потока

Основанием для прекращения измерений является достижение допустимого уровня погрешности, что в свою очередь можно осуществить, оценивая число “лишних” сформированных импульсов при измерении частот сигнала низкого уровня.

Из приведенного выше рисунка видно, что существует определённый уровень, при достижении которого происходит наращивание лишних импульсов. При низких частотах и малых уровнях сигнала шумы находятся в области верхних измеряемых частот, а фильтрация шумов может вредить полезным сигналам в области верхних частот диапазона измерений. Таким образом, когда поток становится ламинарным, наблюдается накопление лишних импульсов (ложные измерения вследствие преобладания шумов над полезным сигналом).

При высоких частотах, когда частота сигнала больше частоты шума, может возникнуть ситуация, при которой амплитуда шума будет больше амплитуды сигнала. В этом случае также будут ложные измерения.

Представляется возможным при соответствующем усложнении прибора определять ситуацию, когда следует завершить накопление импульсов и известить пользователя или сопутствующие системы об этом.

Выражение для вычисления математического ожидания числа нулей для суммы фиксированного синусоидального сигнала и нормального случайного шума, предложенное Райсом [2] и полученное позже Бендатом иным путём, по свидетельству Бендата «слишком сложно для практических целей и не согласуется с результатами, кроме как в неинтересном случае, когда синусоидальная составляющая отсутствует».

В выражение входит интеграл, который может быть вычислен лишь численными методами. Для частных случаев, например, для белого шума с ограниченной полосой частот, Бендат [3] предлагает выражение:

$$\bar{N}_0 = \frac{\omega_0}{\pi} \left[ \frac{p + \frac{1}{3}(a^2 + ab + b^2)}{p + 1} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – круговая частота синусоидального сигнала;  $p$  – отношение сигнала к шуму;  $a \leq 1$  и  $b \geq 1$  константы, такие что  $0 \leq a\omega_0 \leq |\omega| \leq b\omega_0$ , где  $|\omega|$  – полоса частот, которые пропускаются фильтром. В данной формуле частота синусоиды считается постоянной.

Несколько иным аспектам посвящена работа [4]. Кедем в своей работе [5] применяет к решению этого вопроса спектральный анализ, а в работе [6] производит анализ количества пересечений методом высших порядков (Higher Order Crossings). Идея метода состоит в том, чтобы объединять подсчёт числа переходов через ноль с фильтрами. Позже Кедем совместно с Барнеттом определяли число переходов через ноль в продуктах гауссовых процессов [7].

**Цель статьи.** Получение и сравнение оценок числа переходов через ноль, полученных аналитическим путём и путём вычислительного эксперимента.

Для проверки выполнения на практике формулы (1) был проведен эксперимент на ПК, для того, чтобы в дальнейшем использовать полученную модель генератора для разработки алгоритма обработки сигнала.

В качестве генератора случайного шума был выбран стандартный генератор псевдослучайных чисел с нормальным распределением в среде MathCad2001 и генератор псевдослучайных чисел на сдвиговых регистрах с обратной связью, использующий полином  $p(x) = x^{16} + x^{12} + x^3 + x + 1$ , с последующим формированием распределения амплитуд, близкого к нормальному [8]. Были определены характеристики полученных псевдослучайных последовательностей.

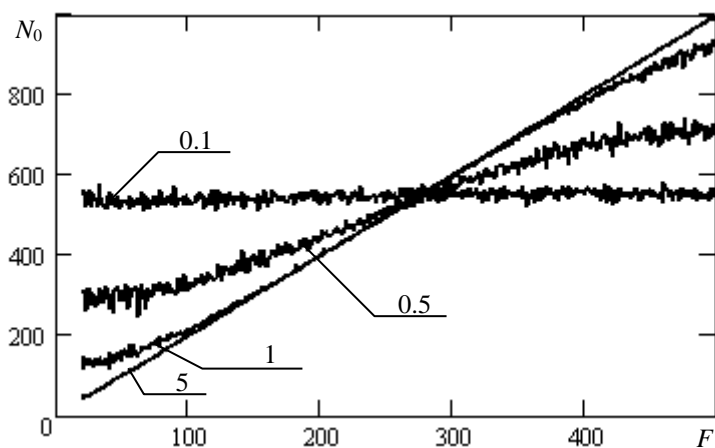
К этому шуму был добавлен полезный сигнал, представляющий собой синусоиду. Так как формула (1) предназначена для ограниченной полосы частот, то полученную нами смесь шума и полезного сигнала нужно пропустить через фильтр низких частот.

Для фильтрации выбран метод скользящего сглаживания с двумя проходами. В первом проходе выборку осуществляли по  $n = 4$  элемента, а во втором по  $n = 5$ .

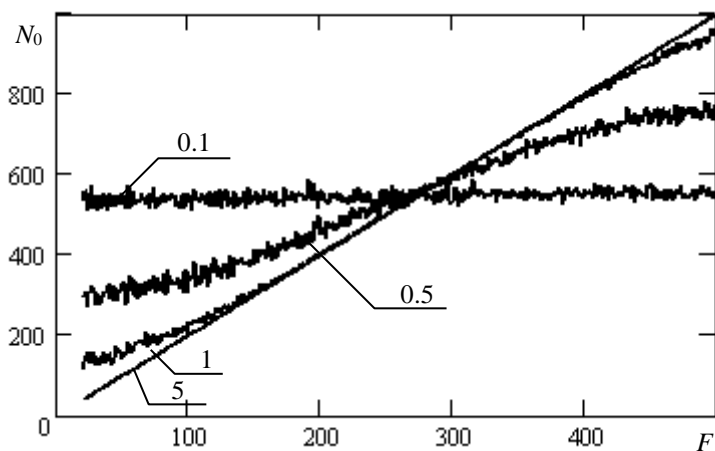
Затем для полученной смеси шума и полезного сигнала в процессе эксперимента был произведён подсчёт числа переходов через нулевой уровень (с соотношением сигнал/шум, равным 0.1, 0.5, 1, 5).

На рис. 2 показаны зависимости, полученные с использованием стандартного генератора псевдослучайных чисел (а) и с использованием генератора псевдослучайных чисел на СРОС (б) с последующим формированием распределения амплитуд.

Используя формулу (1), получили зависимости числа переходов через нулевой уровень от частоты (при таких же соотношениях сигнал/шум). Этот график приведён на рис. 3.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость числа пересечений нулевого уровня от частоты

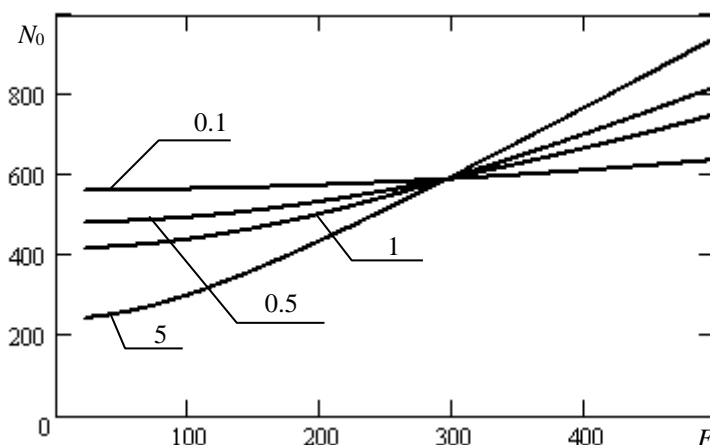


Рис. 3. Зависимость числа пересечений нулевого уровня от частоты, полученная аналитически

**Выводы.** Как видно из полученных результатов, характеристики, полученные аналитически и экспериментально, имеют общие черты, причём, имеется точка пересечения всех кривых.

Однако, в формуле (1) не учитывается квадратичная зависимость амплитуды сигнала от частоты. Также вычисляется математическое ожидание числа нулей не за определенное количество периодов, а за единицу времени для суммы синусоидального сигнала и белого шума с ограниченной полосой частот. Как было выше сказано, в сигнале от реального датчика присутствует квадратичная зависимость амплитуды сигнала от частоты. В дальнейших экспериментах планируется использовать эту зависимость.

**Список литературы:** 1. Бакай А.С., Сугов Ю.С. Многоликая турбулентность. – М.: Знание, 1989. – С. 3-12. 2. Rice S. Mathematical analysis of random noise // Bell Syst.Tech.J.–1945.– Vol. 24.– P. 46-156. 3. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применения. – М.: Наука, 1965. – С. 429-431. 4. Gajic B., Paliwal K. Robust speech recognition using features based on zero crossings with peak amplitudes // IEEE. – 2003. – Vol. 1. – P. 64-67. 5. Kedem B. Spectral Analysis and Discrimination by Zero-Crossings // IEEE. – 1986. – Vol. 74. – P. 1475-1493. 6. He S., Kedem B. Higher Order crossings Spectral Analysis of an Almost Periodic Random Sequence in Noise // IEEE.–1989. – Vol. 35. – P. 360-370. 7. Barnett J., Kedem B. Zero-crossing rates of mixtures and products of Gaussian processes // IEEE. – 1998.– Vol. 44. – P. 1672-1677. 8. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки. – М.: МИР, 1964. – С. 288-307.

Поступила в редакцию 01.10.2004